INDEPENDENT RESEARCH MONOGRAPH

PAROS SUSTAINABLE DEVELOPMENT OBSERVATORY

# THE CHANGING MEDITERRANEAN

## Η Μεσόγειος που αλλάζει

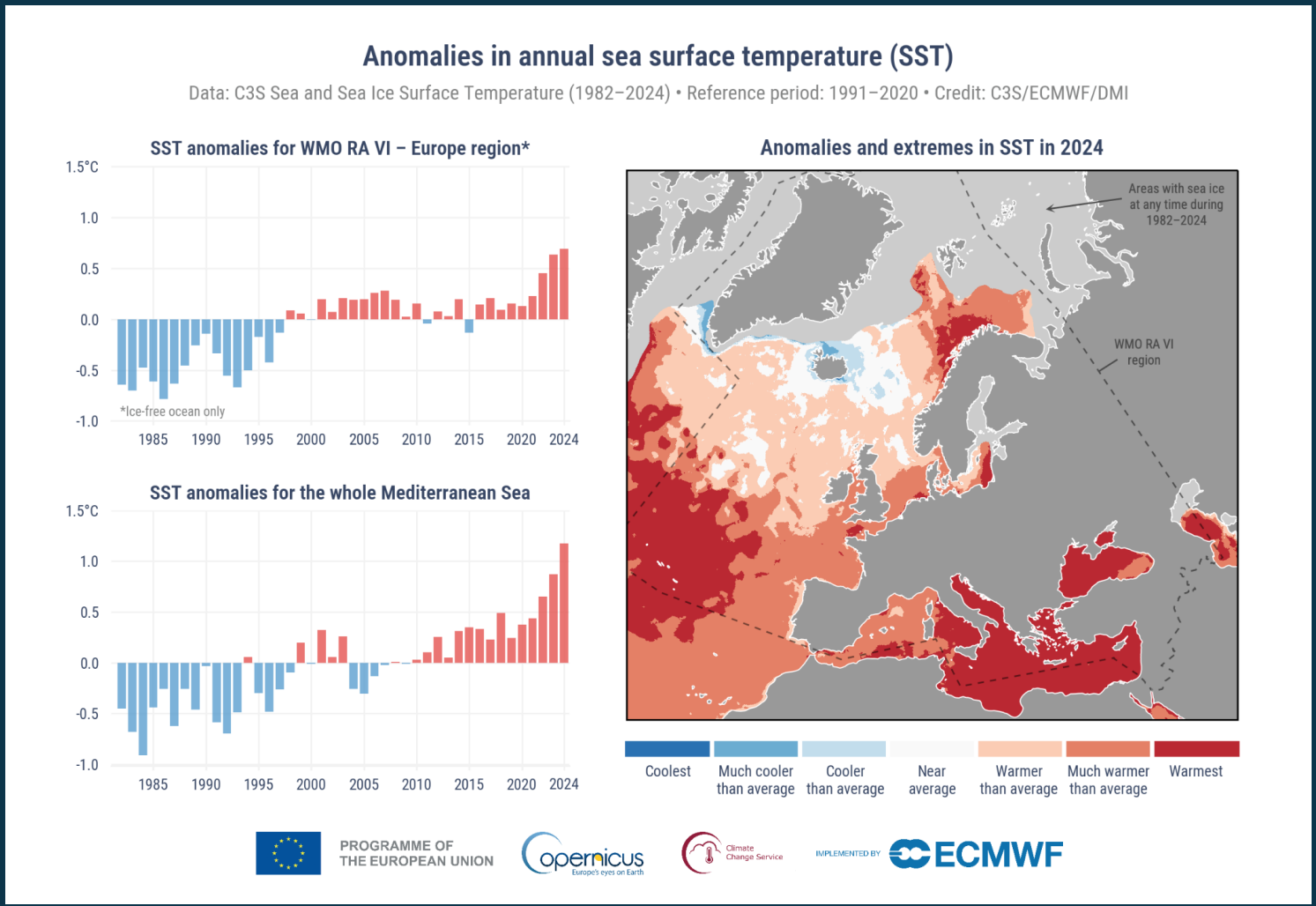
A scientific exploration of the Aegean and the Cyclades

VOLUME I

Warming, stratification, biogeochemistry and acidification
in the Central Cyclades, 1982–2025

**Βασίλης (Bill) Marangozis**

Bilingual edition · Version 1.0 · 15 July 2026




Mediterranean-wide SST context · ESOTC 2024

Data and figure credit: C3S/ECMWF/DMI · Reference period: 1991–2020

## Πώς να διαβαστεί αυτή η έκδοση / How to read this edition

Η παρούσα έκδοση προορίζεται για κατοίκους, επαγγελματίες, εκπαιδευτικούς, αιρετούς και αναγνώστες που ενδιαφέρονται για τη μεταβολή της θάλασσας του Αιγαίου, χωρίς να προϋποθέτει εξειδίκευση στην ωκεανογραφία. Το πλήρες ελληνικό κείμενο παρουσιάζεται πρώτο και ακολουθεί πλήρης αγγλική απόδοση. Οι δύο ενότητες χρησιμοποιούν την ίδια λογική, τα ίδια δεδομένα και τα ίδια συμπεράσματα. Τα κοινά τεχνικά παραρτήματα, οι εικόνες και η βιβλιογραφία συγκεντρώνονται στο τέλος.

This edition is intended for residents, professionals, educators, elected representatives and readers interested in the changing Aegean Sea, without assuming specialist training in oceanography. The complete Greek text appears first, followed by a complete English version. Both sections use the same reasoning, evidence and conclusions. Shared technical appendices, figures and references are collected at the end.

> **Κεντρικό ερώτημα / Central question.** Με ποιον τρόπο αλλάζει η θάλασσα των Κεντρικών Κυκλάδων καθώς θερμαίνεται, και ποιες από τις φυσικές και χημικές συνέπειες μπορούμε ήδη να τεκμηριώσουμε; / How is the sea of the Central Cyclades changing as it warms, and which physical and chemical consequences can already be supported by evidence?

- **ΜΕΡΟΣ Ι —** Πλήρης ελληνική επιστημονική σύνθεση
- **PART II —** Complete English scientific synthesis
- **ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ / PART III —** Κοινές εικόνες, τεχνικά παραρτήματα και βιβλιογραφία / Shared figures, technical appendices and references

> **Γεωγραφική προειδοποίηση.** Η δορυφορική ανάλυση της επιφανειακής θερμοκρασίας αφορά το θαλάσσιο παράθυρο Πάρου–Αντιπάρου. Οι αναλύσεις πλήρους στήλης 0–300 m και οι περισσότερες βιογεωχημικές αναλύσεις αφορούν βαθύτερο περιφερειακό πεδίο των Κεντρικών Κυκλάδων. Δεν αποτελούν μέτρηση μέσα στους παράκτιους όρμους της Πάρου.

# ΜΕΡΟΣ Ι: ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ

*Πλήρης επιστημονική σύνθεση*

## Σύνοψη σε μία σελίδα

Η θάλασσα γύρω από την Πάρο και στις Κεντρικές Κυκλάδες δεν παρουσιάζει απλώς μια ακολουθία μεμονωμένων θερμών καλοκαιριών. Η ανάλυση δορυφορικών παρατηρήσεων και επαναναλύσεων του Copernicus Marine δείχνει μια στατιστικά ισχυρή, πολυδεκαετή μετατόπιση προς θερμότερες συνθήκες. Η μέση θερμοκρασία επιφάνειας στο θαλάσσιο παράθυρο Πάρου–Αντιπάρου αυξήθηκε κατά περίπου **0,40°C ανά δεκαετία** το 1982–2025. Το 2024 ήταν το θερμότερο πλήρες έτος της σειράς, με μέση ανωμαλία περίπου **+1,31°C** έναντι της κλιματολογίας 1991–2020.

Η θέρμανση δεν περιορίζεται στην επιφάνεια. Στο αυστηρό βαθύ περιφερειακό πεδίο των Κεντρικών Κυκλάδων, η μέση θερμοκρασία αυξήθηκε κατά περίπου **+0,446°C ανά δεκαετία στα 0–20 m**, **+0,454°C στα 20–100 m** και **+0,331°C στα 100–300 m** κατά το 1987–2025. Η μέση τάση της πλήρους στήλης 0–300 m ήταν **+0,372°C ανά δεκαετία**, ισοδύναμη με αύξηση θερμικού περιεχομένου περίπου **1,44 W/m²**. Το 2024 είχε μέση θερμοκρασιακή ανωμαλία περίπου **+1,18°C** και μέση ανωμαλία θερμικού περιεχομένου **+1,445 GJ/m²** στη στήλη 0–300 m.

Η διαφορετική ταχύτητα θέρμανσης μεταξύ ανώτερων και βαθύτερων στρωμάτων ενίσχυσε τη στρωμάτωση. Η διαφορά πυκνότητας μεταξύ 0–20 και 100–300 m αυξήθηκε κατά περίπου **0,0403 kg/m³ ανά δεκαετία**. Η μέση πυκνομετρική αντίθεση της περιόδου 2016–2025 ήταν κατά **13,7%** μεγαλύτερη από εκείνη του 1987–1996. Η μακροχρόνια τάση είναι κυρίως θερμική· η αλατότητα επηρεάζει σημαντικά μεμονωμένα έτη, αλλά δεν εξηγεί την πλήρη ανοδική τάση.

Οι βιογεωχημικές συνέπειες είναι πιο σύνθετες. Η θέρμανση έχει μειώσει με μεγάλη βεβαιότητα τη διαλυτότητα του οξυγόνου. Η μοντελοποιημένη πραγματική συγκέντρωση οξυγόνου μειώνεται στα 0–100 m όταν χρησιμοποιείται ολόκληρη η περίοδος 1999–2025, αλλά η τάση είναι ευαίσθητη στα πρόσφατα ακραία έτη. Δεν υπάρχει ένδειξη περιφερειακής υποξίας στα 0–300 m. Τα επιφανειακά θρεπτικά ήταν εξαιρετικά χαμηλά το 2024, ενώ η νιτροκλινής και το βαθύ μέγιστο χλωροφύλλης μετακινήθηκαν βαθύτερα. Δεν ανιχνεύεται όμως στατιστικά ασφαλής μακροχρόνια κατάρρευση της χλωροφύλλης ή της καθαρής πρωτογενούς παραγωγής.

Η καθαρότερη χημική μεταβολή είναι η οξίνιση. Το pH μειώνεται κατά περίπου **−0,011 έως −0,012 μονάδες ανά δεκαετία** σε ολόκληρη τη στήλη 0–300 m. Αυτό αντιστοιχεί σε αύξηση της ενεργότητας των ιόντων υδρογόνου κατά **2,6–2,9% ανά δεκαετία**. Η τάση παραμένει στατιστικά ισχυρή ακόμη και όταν η ανάλυση περιοριστεί στην πλήρως δημοσιευμένη περίοδο 1999–2019. Το 2024 ήταν το χαμηλότερο έτος pH σε όλα τα εξεταζόμενα στρώματα.

Ο κορεσμός αραγωνίτη δεν εμφανίζει ακόμη στατιστικά ασφαλή πτωτική τάση. Η μη θερμική μεταβολή του ανθρακικού συστήματος μειώνει τον κορεσμό, αλλά η θέρμανση από μόνη της τον αυξάνει ελαφρά μέσω της θερμοδυναμικής ισορροπίας, συγκαλύπτοντας μέρος της πτώσης. Δεν εμφανίστηκε μοντελοποιημένη τιμή Ω αραγωνίτη κάτω από 3 στο βαθύ περιφερειακό πεδίο. Αυτό δεν αποτελεί απόδειξη βιολογικής ασφάλειας. Αντίθετα, ο παράγοντας Revelle αυξάνεται στατιστικά αξιόπιστα κατά περίπου **0,50–0,62% ανά δεκαετία**, δείχνοντας ότι η ρυθμιστική ικανότητα του νερού εξασθενεί.

> **Κεντρικό συμπέρασμα.** Η θάλασσα των Κεντρικών Κυκλάδων γίνεται θερμότερη σε βάθος, περισσότερο στρωματοποιημένη, περισσότερο όξινη και λιγότερο χημικά ανθεκτική σε περαιτέρω προσθήκη άνθρακα. Δεν τεκμηριώνεται οικολογική κατάρρευση· τεκμηριώνεται όμως μεταβολή της φυσικής και χημικής βάσης πάνω στην οποία λειτουργεί το οικοσύστημα.

## 1. Σκοπός και επιστημονικό πλαίσιο

Η Μεσόγειος είναι μια ημίκλειστη θάλασσα με έντονη ανταλλαγή θερμότητας, νερού και αλάτων με την ατμόσφαιρα. Η Ανατολική Μεσόγειος χαρακτηρίζεται από υψηλή εξάτμιση, αυξημένη αλατότητα, ολιγοτροφία και ενεργή δημιουργία πυκνών υδάτινων μαζών. Αυτά τα χαρακτηριστικά την καθιστούν ιδιαίτερα ευαίσθητη σε μεταβολές της θερμοκρασίας, της χειμερινής ψύξης, του υδρολογικού ισοζυγίου και της κυκλοφορίας.

Η Πάρος δεν αντιμετωπίζεται εδώ ως απομονωμένο σημείο. Αποτελεί νησιωτική περίπτωση μέσα σε ένα ευρύτερο σύστημα: Μεσόγειος → Ανατολική Μεσόγειος → Αιγαίο → Κεντρικές Κυκλάδες → Πάρος–Αντίπαρος. Η κλιματική βιβλιογραφία τοποθετεί την Ανατολική Μεσόγειο ανάμεσα στις περιοχές όπου η θέρμανση, η στρωμάτωση και η οξίνιση μπορούν να εξελιχθούν γρήγορα, αλλά η παρούσα εργασία δεν θεωρεί εκ των προτέρων ότι κάθε περιφερειακό συμπέρασμα ισχύει αυτούσιο στην Πάρο. Ελέγχει το σήμα με συγκεκριμένα δεδομένα και δηλώνει ρητά το γεωγραφικό επίπεδο κάθε αποτελέσματος.

Τα βασικά ερωτήματα είναι τέσσερα:

1. Υπάρχει στατιστικά αξιόπιστη μακροχρόνια θέρμανση ή οι πρόσφατες ανωμαλίες είναι απλώς ακραία αλλά μεμονωμένα έτη;
2. Περιορίζεται η θέρμανση στην επιφάνεια ή έχει ήδη εισχωρήσει σε βάθος και στο θερμικό απόθεμα της θάλασσας;
3. Συνοδεύεται η θέρμανση από ισχυρότερη στρωμάτωση και από ανιχνεύσιμες βιογεωχημικές μεταβολές;
4. Υπάρχει αξιόπιστη οξίνιση και τι σημαίνει για τον ανθρακικό κορεσμό και τη ρυθμιστική ικανότητα του νερού;

## 2. Δεδομένα, χωρικός ορισμός και αποδεικτική ισχύς

Η ανάλυση χρησιμοποιεί τρεις κύριες κατηγορίες δεδομένων.

**Δορυφορική θερμοκρασία επιφάνειας.** Η μακροχρόνια σειρά 1982–2025 προέρχεται από το επανεπεξεργασμένο προϊόν Copernicus Marine `SST_MED_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_021`: ημερήσια, νυχτερινή θερμοκρασία θεμελίου της επιφάνειας, χωρικής ανάλυσης 0,05°. Για τη λεπτομερή χαρτογράφηση του 2024 χρησιμοποιήθηκε το υπερυψηλής ανάλυσης προϊόν της ίδιας υπηρεσίας, περίπου 1 km. Η δορυφορική SST έχει την ισχυρότερη άμεση παρατηρησιακή βάση της μελέτης, αλλά δεν είναι θερμοκρασία λουομένου στην ακτή ούτε μεσημβρινή θερμοκρασία ρηχού όρμου.

**Φυσική επανανάλυση.** Η θερμοκρασία, η αλατότητα, το βάθος μικτού στρώματος και το θερμικό περιεχόμενο προέρχονται από το `MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004`, ανάλυσης 1/24° ή περίπου 4–5 km και 141 κατακόρυφων επιπέδων. Το σύστημα βασίζεται στο NEMO και αφομοιώνει κατακόρυφα προφίλ θερμοκρασίας–αλατότητας και δορυφορικά δεδομένα στάθμης. Είναι μοντέλο με αφομοίωση παρατηρήσεων, όχι συνεχής τοπική μέτρηση.

**Βιογεωχημική επανανάλυση.** Το οξυγόνο, τα θρεπτικά, η χλωροφύλλη, η πρωτογενής παραγωγή, το DIC, η ολική αλκαλικότητα και το pH προέρχονται από το MEDSEA_MULTIYEAR_BGC_006_008, ανάλυσης περίπου 4 km και 125 επιπέδων. Το MedBFM3 εξαναγκάζεται από τη φυσική επανανάλυση και αφομοιώνει εβδομαδιαία δορυφορική χλωροφύλλη επιφάνειας. Συνεπώς, η θερμοκρασία έχει ισχυρότερη ανεξάρτητη παρατηρησιακή βάση από το οξυγόνο, τα θρεπτικά ή το ανθρακικό σύστημα.

Για την πλήρη στήλη 0–300 m ορίστηκε γεωδαιτικός κύκλος ακτίνας 75 km με κέντρο την Πάρο, 37,05°N και 25,15°E. Από αυτόν χρησιμοποιήθηκαν μόνο 184 θαλάσσια κελιά που διαθέτουν πλήρη στήλη 300 m. Η συνολική επιφάνειά τους είναι 3.156,44 km². Σχηματίζουν εννέα ασύνδετες βαθιές λεκάνες και το πλησιέστερο κελί απέχει 39,64 km από το κέντρο της Πάρου. Η αυστηρή αυτή επιλογή εξασφαλίζει κοινό κατακόρυφο αποτύπωμα, αλλά αποκλείει τα ρηχά παράκτια νερά.

Η ιεράρχηση των τεκμηρίων είναι:

1. άμεσες τοπικές επιτόπιες παρατηρήσεις, όπου υπάρχουν,
2. δορυφορικές παρατηρήσεις,
3. φυσική επανανάλυση με αφομοίωση δεδομένων,
4. βιογεωχημική επανανάλυση,
5. ευρύτερη περιφερειακή βιβλιογραφία και προβολές.

Οι γραμμικές τάσεις ελέγχθηκαν με διαστήματα εμπιστοσύνης 95% και διακύμανση Newey–West/HAC για χρονική αυτοσυσχέτιση. Χρησιμοποιήθηκαν συμπληρωματικά εκτιμήσεις Theil–Sen και έλεγχοι Kendall ή Mann–Kendall. Οι φυσικές ανωμαλίες αναφέρονται κυρίως στην κλιματολογία 1991–2020 και οι βιογεωχημικές συγκρίσεις στον μέσο όρο 2000–2019. Η στατιστική αβεβαιότητα της τάσης διακρίνεται από τη δομική αβεβαιότητα του μοντέλου.

## 3. Η επιφανειακή θέρμανση Πάρου–Αντιπάρου

Η μέση ετήσια SST αυξήθηκε κατά **+0,3997°C ανά δεκαετία** το 1982–2025. Το διάστημα εμπιστοσύνης 95% είναι **+0,309 έως +0,490°C ανά δεκαετία** και η πιθανότητα η τάση να προέκυψε τυχαία είναι εξαιρετικά μικρή. Η Theil–Sen εκτίμηση, **+0,424°C ανά δεκαετία**, και ο Kendall οδηγούν στο ίδιο συμπέρασμα. Η μέση SST της δεκαετίας 2016–2025 ήταν κατά **1,36°C** υψηλότερη από εκείνη της δεκαετίας 1982–1991.

Η θέρμανση εμφανίζεται σε όλες τις εποχές, αλλά είναι εντονότερη το καλοκαίρι και το φθινόπωρο: περίπου **+0,464°C ανά δεκαετία** το καλοκαίρι και **+0,437°C** το φθινόπωρο. Αυτό αυξάνει τη θερμοκρασιακή βάση πάνω στην οποία εκδηλώνονται οι βραχυχρόνιες ακραίες συνθήκες. Ένας καύσωνας ίδιου μετεωρολογικού μεγέθους δρα πλέον πάνω σε ήδη θερμότερη θάλασσα.

Το 2024 είχε μέση SST **20,895°C** και ανωμαλία **+1,311°C** από το 1991–2020. Ήταν το θερμότερο πλήρες έτος της σειράς, μπροστά από το 2010 και το 2023. Η λεπτομερής χωρική χαρτογράφηση έδειξε μέση ετήσια ανωμαλία πάνω από +1°C σε ολόκληρο το εξεταζόμενο θαλάσσιο παράθυρο και έως περίπου +1,38°C στα θερμότερα κελιά. Σε πολλές θέσεις, η ημερήσια ανωμαλία ξεπέρασε τον +1°C για περισσότερες από 200 ημέρες.

Με τον ορισμό θαλάσσιου καύσωνα που χρησιμοποιεί το 90ό εκατοστημόριο της περιόδου 1982–2011, τουλάχιστον πέντε συνεχόμενες ημέρες και δυνατότητα σύνδεσης επεισοδίων με μικρό κενό, οι ημέρες

θαλάσσιου καύσωνα αυξήθηκαν κατά περίπου **28,5 ημέρες ανά δεκαετία**. Ο αριθμός εξαρτάται από τον ορισμό και τη βάση αναφοράς, αλλά η κατεύθυνση της μεταβολής είναι σαφής.

## 4. Η θέρμανση κάτω από την επιφάνεια

Η φυσική επανανάλυση 1987–2025 δείχνει ότι η θέρμανση έχει ήδη εισχωρήσει βαθιά. Στο κοινό αποτύπωμα των 184 κελιών, η τάση ήταν:

| Στρώμα | Τάση θερμοκρασίας | 95% διάστημα Newey–West | Θερμική πρόσληψη |
|---|---|---|---|
| 0–20 m | +0,446°C/δεκαετία | +0,382 έως +0,511 | +0,116 W/m² |
| 20–100 m | +0,454°C/δεκαετία | +0,360 έως +0,547 | +0,470 W/m² |
| 100–300 m | +0,331°C/δεκαετία | +0,275 έως +0,388 | +0,858 W/m² |
| 0–300 m | +0,372°C/δεκαετία | +0,312 έως +0,432 | +1,443 W/m² |

Η τάση παραμένει θετική και στατιστικά ισχυρή σε όλο το κατακόρυφο προφίλ έως περίπου 300 m. Κοντά στα 300 m η εκτίμηση είναι περίπου +0,30°C ανά δεκαετία. Δεν ανιχνεύθηκε στατιστικά ασφαλής τετραγωνική επιτάχυνση της τάσης στη σύντομη περίοδο 1987–2025· αυτό δεν σημαίνει ότι η κλιματική θέρμανση δεν επιταχύνεται παγκοσμίως, αλλά ότι η συγκεκριμένη τοπικοπεριφερειακή σειρά δεν διακρίνει αξιόπιστα καμπυλότητα πέρα από την ισχυρή γραμμική τάση.

Περίπου **59,4%** της μακροχρόνιας αύξησης θερμικού περιεχομένου 0–300 m βρίσκεται στο στρώμα 100–300 m, **32,5%** στα 20–100 m και **8,0%** στα 0–20 m. Τα ποσοστά επηρεάζονται από το πάχος κάθε στρώματος. Παρ' όλα αυτά, αποδεικνύουν ότι το μεγαλύτερο μέρος της πρόσθετης ενέργειας της στήλης δεν βρίσκεται στα ανώτερα 20 m. Η θάλασσα έχει αποκτήσει βαθιά θερμική μνήμη.

Το 2024 η θερμοκρασιακή ανωμαλία ήταν περίπου **+1,36°C** στα 0–20 m, **+1,58°C** στα 20–100 m και **+1,00°C** στα 100–300 m. Η μέση ανωμαλία της πλήρους στήλης ήταν **+1,18°C**. Από την ετήσια μέση ανωμαλία θερμικού περιεχομένου, περίπου 56,5% βρισκόταν στα 100–300 m.

## 5. Θερμικό ισοζύγιο και η κληρονομιά του 2024

Για να εξεταστεί αν το εξαιρετικό θερμικό φορτίο εξηγείται μόνο από την ατμόσφαιρα, κατασκευάστηκε διαγνωστικό ισοζύγιο:

> **Μεταβολή θερμικού περιεχομένου 0–300 m = ανωμαλία καθαρής επιφανειακής ροής + υπόλοιπο.**

Η επιφανειακή ροή προήλθε από το Copernicus έως τον Μάιο 2023 και επεκτάθηκε με ERA5 έως τον Δεκέμβριο 2025. Η ανακατασκευή αξιολογήθηκε με επτά συνεχόμενα τμήματα διασταυρωμένης επαλήθευσης: μηνιαία συσχέτιση 0,997, RMSE 12,31 W/m² και RMSE ετήσιου μέσου περίπου 6,30 W/m².

Το 2023 είχε θετική επιφανειακή ανωμαλία, πολύ ρηχότερο μικτό στρώμα και μεγάλη αύξηση θερμικού περιεχομένου. Από τον Οκτώβριο 2023 έως τον Μάρτιο 2024 η καθαρή επιφανειακή ανωμαλία ήταν περίπου **+17,27 W/m²**, ενώ το μικτό στρώμα ήταν κατά μέσο όρο **26,3 m ρηχότερο** από την κλιματολογία. Έτσι, το 2024 ξεκίνησε ήδη με μεγάλο πλεόνασμα θερμότητας συγκεντρωμένο σε μικρότερο όγκο νερού.

Από την άνοιξη έως το καλοκαίρι του 2024 η επιφάνεια συνέχισε να προσθέτει θερμότητα. Το φθινόπωρο, όμως, οι αυξημένες λανθάνουσες απώλειες αντέστρεψαν το ετήσιο πρόσημο της ανακατασκευασμένης ροής. Παρά την ψύξη των ανώτερων 100 m προς το τέλος του έτους, το στρώμα 100–300 m κέρδισε περίπου **0,428 GJ/m²** από Δεκέμβριο σε Δεκέμβριο. Η πλήρης στήλη κέρδισε **0,278 GJ/m²**.

Στο τριετές διάστημα 2023–2025, η σωρευτική επιφανειακή ανωμαλία ήταν περίπου **+0,411 GJ/m²**, ενώ το θερμικό περιεχόμενο του Δεκεμβρίου αυξήθηκε κατά **+1,188 GJ/m²**. Το θετικό υπόλοιπο, **+0,776 GJ/m²**, δείχνει ότι η πλευρική και κατακόρυφη μεταφορά, η ανακατανομή της θερμότητας και οι διαφορές των επαναναλύσεων είναι ουσιώδεις. Δεν επιτρέπει ακόμη την απόδοση του αποτελέσματος σε έναν μοναδικό μηχανισμό.

Το 2025 προσφέρει την αναγκαία διόρθωση στην ιδέα ότι κάθε θερμό έτος συσσωρεύει μηχανικά νέο τοπικό φορτίο. Παρά τη θετική επιφανειακή ανωμαλία, το θερμικό περιεχόμενο Δεκεμβρίου–Δεκεμβρίου έμεινε σχεδόν αμετάβλητο: τα ανώτερα 100 m κέρδισαν θερμότητα, ενώ τα 100–300 m έχασαν σχεδόν αντίστοιχη ποσότητα. Η θερμότητα μπορεί να αποθηκεύεται, να ανακατανέμεται ή να εξάγεται από το περιφερειακό πεδίο.

## 6. Στρωμάτωση, κατακόρυφη ανάμειξη και δημιουργία βαθέων υδάτων

Η στρωμάτωση εκφράζει τη σταθερότητα της υδάτινης στήλης. Όταν το ανώτερο νερό είναι ελαφρύτερο από το βαθύτερο, απαιτείται ενέργεια για να αναμειχθούν τα στρώματα. Η θέρμανση μειώνει την πυκνότητα, ενώ η αύξηση της αλατότητας την αυξάνει. Γι’ αυτό η θερμοκρασία επιφάνειας από μόνη της δεν αρκεί για να περιγράψει την κατακόρυφη κυκλοφορία.

Μετρήθηκαν τρεις αντιθέσεις μεταξύ 0–20 και 100–300 m: θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας. Η θερμική αντίθεση αυξήθηκε κατά **+0,115°C ανά δεκαετία** και η πυκνομετρική κατά **+0,0403 kg/m³ ανά δεκαετία**. Και οι δύο τάσεις είναι στατιστικά ισχυρές. Η αντίθεση αλατότητας δεν παρουσίασε αξιόπιστη μακροχρόνια τάση. Η μέση πυκνομετρική αντίθεση αυξήθηκε από 0,968 kg/m³ το 1987–1996 σε 1,100 kg/m³ το 2016–2025.

Η ενίσχυση εμφανίζεται τόσο το καλοκαίρι όσο και τον χειμώνα. Το 2024 είχε τη μεγαλύτερη ετήσια πυκνομετρική αντίθεση ολόκληρης της περιόδου, **1,235 kg/m³**, κατά 0,172 kg/m³ υψηλότερη από τη βάση 1991–2020. Εκείνο το έτος η αλατότητα ενίσχυσε επιπλέον τη σταθερότητα, παρότι δεν εξηγεί τη μακροχρόνια τάση. Το 2023 είχε την ισχυρότερη χειμερινή πυκνομετρική αντίθεση και συμφωνεί με την εικόνα της ασυνήθιστα ρηχής χειμερινής ανάμειξης που προηγήθηκε του 2024.

Ισχυρότερη στρωμάτωση μπορεί να μειώσει τη μεταφορά θρεπτικών προς την εύφωτη ζώνη και να δυσκολέψει τον αερισμό βαθύτερων στρωμάτων. Μπορεί επίσης να επηρεάσει τη δημιουργία πυκνών υδάτων, διαδικασία κατά την οποία έντονη χειμερινή ψύξη και εξάτμιση αυξάνουν την πυκνότητα των επιφανειακών νερών μέχρι να βυθιστούν. Το Αιγαίο συμμετέχει ενεργά στην ανανέωση των υδάτινων μαζών της Ανατολικής Μεσογείου και η διαδικασία είναι επεισοδιακή: ένα πολύ ψυχρό ή αλμυρό χειμερινό επεισόδιο μπορεί προσωρινά να υπερνικήσει τη μέση τάση.

Οι κλιματικές προβολές υποδεικνύουν ότι η ενίσχυση της στρωμάτωσης μπορεί να μειώσει σημαντικά τη μελλοντική δημιουργία πυκνών υδάτων στο Αιγαίο (Parras-Berrocal et al., 2023). Αυτό είναι περιφερειακή προβολή και όχι αποτέλεσμα της δικής μας ιστορικής διάγνωσης. Η παρούσα ανάλυση τεκμηριώνει την αύξηση της αντίστασης στην ανάμειξη· δεν υπολογίζει απευθείας όγκους δημιουργούμενων βαθέων υδάτων, κατακόρυφες ταχύτητες ή ροές μέσα από συγκεκριμένα στενά.

## 7. Οξυγόνο, θρεπτικά και χλωροφύλλη

Η θερμοκρασία επηρεάζει το οξυγόνο με δύο διαφορετικούς τρόπους. Πρώτον, το θερμότερο νερό διαλύει λιγότερο οξυγόνο — μια άμεση φυσικοχημική επίδραση. Δεύτερον, η στρωμάτωση, η ανάμειξη, η παραγωγή και η αναπνοή μπορούν να μεταβάλουν την πραγματική συγκέντρωση. Η διάκριση είναι κρίσιμη.

Στην περίοδο 1999–2025, η μοντελοποιημένη πραγματική συγκέντρωση $O_2$ μειώθηκε κατά **−1,248 mmol/m³ ανά δεκαετία στα 0–20 m** και **−1,100 mmol/m³ στα 20–100 m**. Στα 100–300 m η τάση, −0,149 mmol/m³ ανά δεκαετία, δεν ήταν στατιστικά σημαντική. Η θεωρητική διαλυτότητα μειώθηκε ταχύτερα, περίπου −1,68 έως −1,91 mmol/m³ ανά δεκαετία. Αυτό δείχνει ότι η ανιχνευόμενη επιφανειακή αποξυγόνωση οφείλεται κυρίως στη φυσική μείωση της διαλυτότητας και όχι σε αποδεδειγμένη αύξηση αναπνοής ή αποσύνθεσης.

Η τάση της πραγματικής συγκέντρωσης είναι ευαίσθητη στην περίοδο. Στο αυστηρότερο διάστημα 1999–2019 δεν περνά το όριο 5%, ενώ η μείωση της διαλυτότητας παραμένει σημαντική. Συνεπώς, η φυσική επίδραση της θέρμανσης είναι ισχυρότερο εύρημα από τη μακροχρόνια βιογεωχημική αποξυγόνωση.

Το 2024 ήταν το χαμηλότερο έτος μοντελοποιημένου οξυγόνου σε όλα τα στρώματα, με αποκλίσεις περίπου −1,0 έως −2,0% από το 2000–2019. Οι απόλυτες τιμές, περίπου 7,1–7,4 mg/L, παρέμειναν πολύ πάνω από το συνήθως χρησιμοποιούμενο όριο υποξίας των 2 mg/L. Δεν υπάρχει ένδειξη περιφερειακής υποξίας στα 0–300 m.

Τα νιτρικά παρουσίασαν πτωτικές τάσεις στα 0–20 και 100–300 m για το 1999–2025, ενώ τα βαθύτερα φωσφορικά μειώθηκαν επίσης. Πολλές από αυτές τις τάσεις εξασθενούν όταν αφαιρεθούν τα έτη μετά το 2019 και πρέπει να χαρακτηριστούν ως πρόσφατα ενισχυόμενες ενδείξεις. Η ετήσια πυκνομετρική στρωμάτωση συσχετίζεται αρνητικά με τα επιφανειακά νιτρικά ακόμη και μετά την αφαίρεση της γραμμικής τάσης, αλλά φυσικό και βιογεωχημικό προϊόν είναι συζευγμένα και η συσχέτιση δεν αποτελεί ανεξάρτητη αιτιώδη απόδειξη.

Το 2024 είχε τα χαμηλότερα επιφανειακά νιτρικά και φωσφορικά της σειράς: περίπου **−18,4%** και **−32,1%** αντίστοιχα έναντι του 2000–2019. Το θερινό υποεπιφανειακό μέγιστο οξυγόνου βρέθηκε περίπου 17 m βαθύτερα, το βαθύ μέγιστο χλωροφύλλης 12,5 m βαθύτερα και η νιτροκλινής των 1 mmol/m³ περίπου 15 m βαθύτερα. Η ταυτόχρονη μετατόπιση είναι συμβατή με βαθύτερη απομόνωση των θρεπτικών και της παραγωγικής ζώνης. Οι μακροχρόνιες τάσεις αυτών των βαθών, ωστόσο, δεν είναι στατιστικά ασφαλείς.

Η χλωροφύλλη δεν παρουσιάζει αξιόπιστη μακροχρόνια τάση σε κανένα από τα βασικά στρώματα. Το απόθεμα 0–100 m ήταν 14,1% χαμηλότερο από τη βάση το 2024 και το δεύτερο χαμηλότερο της σειράς, αλλά η διαχρονική μεταβλητότητα δεν επιτρέπει να μιλήσουμε για τεκμηριωμένη κατάρρευση.

## 8. Πρωτογενής παραγωγή και το φαινομενικό παράδοξο του 2024

Η χλωροφύλλη δεν είναι ταυτόσημη με τη φυτοπλαγκτονική βιομάζα και η βιομάζα δεν είναι ταυτόσημη με τον ρυθμό παραγωγής. Η ειδική ανάλυση του άνθρακα του φυτοπλαγκτού και της καθαρής πρωτογενούς παραγωγής ανέδειξε ένα σημαντικό παράδοξο.

Το 2024 είχε τη χαμηλότερη ετήσια φυτοπλαγκτονική βιομάζα άνθρακα της μοντελοποιημένης σειράς, περίπου 19–21% κάτω από τη βάση ανάλογα με το στρώμα. Παρ' όλα αυτά, η καθαρή πρωτογενής παραγωγή δεν μειώθηκε σε ετήσια βάση. Στη στήλη 0–300 m ήταν η υψηλότερη τιμή του μοντέλου. Η παραγωγή ανά μονάδα βιομάζας ήταν επίσης η υψηλότερη, υποδεικνύοντας ταχύτερη ανανέωση του άνθρακα και αναγκαστικά αυξημένες συνολικές απώλειες μέσω βόσκησης, αναπνοής, θνησιμότητας, διάλυσης ή εξαγωγής.

Η εποχική εικόνα εξηγεί μέρος του αποτελέσματος. Το καλοκαίρι του 2024 η NPP 0–100 m μειώθηκε κατά περίπου **8%**, ενώ η βιομάζα μειώθηκε κατά **31,8%**. Η χειμερινή, ανοιξιάτικη και φθινοπωρινή παραγωγή ήταν αυξημένη και αντιστάθμισε τη θερινή κάμψη. Αυτό είναι συμβατό με ανακατανομή της εποχικότητας, όχι με γενικευμένη παύση της παραγωγής.

Ο λόγος χλωροφύλλης προς φυτοπλαγκτονικό άνθρακα αυξάνεται στατιστικά αξιόπιστα. Έτσι η χλωροφύλλη μπορεί να υποεκτιμά την πτώση της πραγματικής βιομάζας άνθρακα. Το 2024 το θερινό μέγιστο χλωροφύλλης και το μέγιστο φυτοπλαγκτονικού άνθρακα συνέπεσαν περίπου στα 118 m, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι κάθε βαθύ μέγιστο χλωροφύλλης είναι πάντοτε μέγιστο βιομάζας.

Το αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα μοντελοεξαρτώμενο. Στο BFM η θερμοκρασία επιταχύνει πολλές μεταβολικές διεργασίες μέσω συνάρτησης Q10. Άλλα μεσογειακά μοντέλα, με διαφορετική παραμετροποίηση της προσαρμογής και των θρεπτικών, μπορούν να παράγουν διαφορετική απόκριση. Η ασφαλής διατύπωση είναι ότι δεν αποδεικνύεται μακροχρόνια κατάρρευση παραγωγικότητας, αλλά το 2024 παρουσιάζει σαφή πρόσφατη μετατόπιση της λειτουργίας του πελαγικού συστήματος.

## 9. Οξίνιση της στήλης 0–300 m

Το pH είναι λογαριθμικό μέτρο της ενεργότητας των ιόντων υδρογόνου. Μείωση του pH δεν σημαίνει ότι το θαλασσινό νερό γίνεται όξινο με την καθημερινή έννοια ή ότι πέφτει κάτω από 7. Σημαίνει μετατόπιση προς μεγαλύτερη οξύτητα. Πτώση 0,01 μονάδων αντιστοιχεί περίπου σε αύξηση $H^+$ κατά 2,3%.

Η τάση του pH είναι η καθαρότερη βιογεωχημική μεταβολή της ανάλυσης:

| Στρώμα | Μέσο pH 2000–2019 | Τάση ανά δεκαετία | Αύξηση $H^+$/δεκαετία | pH 2024 |
|---|---|---|---|---|
| 0–20 m | 8,1043 | −0,01233 | +2,88% | 8,0806 |
| 20–100 m | 8,1244 | −0,01211 | +2,83% | 8,0960 |
| 100–300 m | 8,1409 | −0,01103 | +2,57% | 8,1178 |
| 0–300 m | 8,1338 | −0,01141 | +2,66% | 8,1092 |

Όλες οι τάσεις είναι στατιστικά ισχυρές με διόρθωση Newey–West και παραμένουν σημαντικές στο 1999–2019. Η οξίνιση δεν δημιουργείται μόνο από τα έτη 2023–2025 και δεν περιορίζεται σε μία εποχή. Το 2024 ήταν το χαμηλότερο έτος pH σε όλα τα στρώματα και η ενεργότητα $H^+$ ήταν περίπου 5,5–6,8% υψηλότερη από τη βάση.

Ο διαλυμένος ανόργανος άνθρακας αυξάνεται κατά περίπου **+16,6 έως +17,1 μmol/kg ανά δεκαετία** και η ολική αλκαλικότητα κατά **+14,7 έως +15,3 μmol/kg**. Η αλατότητα αυξάνεται κατά περίπου 0,09–0,10 PSU ανά δεκαετία, οπότε μέρος της ανόδου DIC και TA οφείλεται σε συμπύκνωση. Όμως οι τιμές κανονικοποιημένες σε αλατότητα 38 αυξάνονται επίσης και ο λόγος DIC/TA αυξάνεται σε όλα τα στρώματα. Η μεταβολή δεν εξηγείται μόνο από εξάτμιση.

Η υψηλή αλκαλικότητα της Ανατολικής Μεσογείου λειτουργεί ως ρυθμιστικό απόθεμα, αλλά δεν αποτρέπει την οξίνιση. Η γρήγορη ανανέωση και βύθιση υδάτινων μαζών μπορεί ταυτόχρονα να διευκολύνει τη μεταφορά απορροφημένου άνθρακα σε μεγαλύτερα βάθη. Η πρώτη υψηλής συχνότητας σειρά pH και $pCO_2$ στον πλωτήρα Ηρακλείου προσφέρει χρήσιμη εξωτερική αναφορά, αλλά η μικρή διάρκειά της και η απόσταση δεν την καθιστούν τοπική επικύρωση των Κυκλάδων (Frangoulis et al., 2024).

## 10. Ανθρακικά ιόντα, κορεσμός και ρυθμιστική ικανότητα

Το pH δεν αρκεί για την αξιολόγηση του ανθρακικού συστήματος. Η συγκέντρωση $CO_3^{2-}$ και ο βαθμός κορεσμού Ω καθορίζουν το θερμοδυναμικό περιθώριο των ορυκτών ανθρακικού ασβεστίου. Το Ω=1 είναι το όριο θερμοδυναμικού κορεσμού, όχι καθολικό βιολογικό κατώφλι.

Οι υπολογισμοί έγιναν σε κάθε τρισδιάστατο κελί και μήνα με PyCO2SYS 1.8.3.4, χρησιμοποιώντας DIC και TA, θερμοκρασία, αλατότητα, πίεση και φωσφορικά. Η κύρια επιλογή σταθερών Hansson/Dickson–Millero αναπαρήγαγε το εσωτερικό pH του MedBFM με RMSE περίπου 0,00060. Αυτό τεκμηριώνει αριθμητική εσωτερική συνέπεια, όχι ανεξάρτητη παρατηρησιακή ακρίβεια. Το επίσημο QUID αναφέρει RMSD pH περίπου 0,034–0,042 έναντι μεσογειακών in-situ δεδομένων στα 0–300 m.

Η μέση Ω αραγωνίτη της βάσης ήταν 3,924 στα 0–20 m, 3,776 στα 20–100 m και 3,561 στα 100–300 m. Οι κεντρικές τάσεις ήταν αρνητικές, **−0,0134**, **−0,00837** και **−0,00322 ανά δεκαετία** αντίστοιχα, αλλά κανένα διάστημα εμπιστοσύνης δεν απέκλεισε το μηδέν. Η μείωση των ανθρακικών ιόντων ήταν στατιστικά σημαντική μόνο στα 0–20 m για την πλήρη περίοδο και όχι στο 1999–2019.

Στον έλεγχο 2.623.104 σημείων–μηνών δεν εμφανίστηκε Ω αραγωνίτη κάτω από 3. Η χαμηλότερη τιμή της κύριας λύσης ήταν περίπου 3,314 και στην εναλλακτική λύση Lueker 3,284. Η απουσία χαμηλού μοντελοποιημένου κορεσμού στο υπεράκτιο πεδίο δεν αποκλείει βιολογικές επιδράσεις του χαμηλότερου pH, ούτε διαφορετικά άκρα σε ρηχούς όρμους όπου η αναπνοή, η παραγωγή, τα γλυκά νερά και η ημερήσια μεταβλητότητα είναι ισχυρότερα.

Η διάσπαση της τάσης έδειξε ότι περίπου **47–52%** της πτώσης pH είναι η άμεση θερμοδυναμική επίδραση της θέρμανσης και **48–53%** η μη θερμική συνιστώσα DIC–TA–αλατότητας–φωσφορικών. Η μη θερμική συνιστώσα μειώνει την Ω αραγωνίτη, ενώ η θέρμανση από μόνη της την αυξάνει ελαφρά. Έτσι οι δύο επιδράσεις αλληλοαναιρούνται εν μέρει. Η «μη θερμική» συνιστώσα δεν ισούται με ανθρωπογενές $CO_2$: περιλαμβάνει επίσης κυκλοφορία, ανάμειξη, βιολογία, αλατότητα και μεταβολές αλκαλικότητας.

Ο διαγνωστικός $pCO_2$ αυξήθηκε κατά **+12,8 έως +15,9 μatm ανά δεκαετία** και ο παράγοντας Revelle κατά **+0,0489 έως +0,0590 ανά δεκαετία**, ή περίπου 0,50–0,62%. Οι τάσεις είναι ισχυρές και παραμένουν σημαντικές στο 1999–2019. Αυτό είναι το σταθερότερο συμπέρασμα της δεύτερης φάσης: ακόμη κι όταν η Ω δεν έχει σαφή πτωτική τάση, η ίδια σχετική προσθήκη DIC προκαλεί σταδιακά μεγαλύτερη σχετική αύξηση $pCO_2$. Η ανθρακική ρύθμιση εξασθενεί.

## 11. Ενιαία ερμηνεία: ένα σύστημα πολλαπλών πιέσεων

Τα αποτελέσματα σχηματίζουν μια συνεκτική αλλά όχι απλοϊκή αλυσίδα. Η άνοδος της θερμοκρασίας αυξάνει το θερμικό απόθεμα και, επειδή τα ανώτερα στρώματα θερμαίνονται ταχύτερα, ενισχύει τη στρωμάτωση. Η ισχυρότερη στρωμάτωση αυξάνει την αντίσταση στην ανάμειξη και μπορεί να περιορίσει την ανατροφοδότηση θρεπτικών ή τον αερισμό. Παράλληλα, η θέρμανση μειώνει άμεσα τη διαλυτότητα οξυγόνου και το pH. Η αύξηση του DIC σε σχέση με την αλκαλικότητα προσθέτει μια δεύτερη, μη θερμική συνιστώσα οξίνισης.

Δεν ακολουθούν όλες οι μεταβλητές την ίδια κατεύθυνση ούτε την ίδια ταχύτητα. Το οξυγόνο δεν έχει φθάσει σε υποξικά επίπεδα. Η χλωροφύλλη και η NPP δεν παρουσιάζουν αποδεδειγμένη μακροχρόνια κατάρρευση. Η Ω αραγωνίτη παραμένει υψηλή και χωρίς στατιστικά ασφαλή τάση, εν μέρει επειδή η θέρμανση αντισταθμίζει θερμοδυναμικά τη μη θερμική πτώση. Οι φαινομενικές αντιφάσεις δεν αναιρούν τη μεταβολή του συστήματος· δείχνουν ότι διαφορετικοί μηχανισμοί και χρονικές κλίμακες αλληλεπιδρούν.

Το 2024 λειτουργεί ως δοκιμή αντοχής. Συνδύασε θερμότητα κληρονομημένη από το 2023, ρηχότερη χειμερινή ανάμειξη, υψηλή θερμοκρασία σε βάθος, μέγιστη πυκνομετρική αντίθεση, χαμηλό οξυγόνο και θρεπτικά, χαμηλή βιομάζα φυτοπλαγκτού και το χαμηλότερο pH. Δεν είχε όμως τη χαμηλότερη Ω αραγωνίτη ούτε τη χαμηλότερη ετήσια NPP. Αυτό ακριβώς αποδεικνύει ότι η κατάσταση της θάλασσας δεν μπορεί να περιγραφεί με έναν μοναδικό δείκτη.

Η ταχύτερη μεταβολή της Ανατολικής Μεσογείου δεν έχει μία μόνο τοπική αιτία. Συνδέεται με τη θέρμανση της υπερκείμενης ατμόσφαιρας και των γύρω ηπειρωτικών περιοχών, τη φύση της ημίκλειστης λεκάνης, τις μεταβολές της χειμερινής απώλειας θερμότητας, την εξάτμιση και αλατότητα, τη στρωμάτωση και τη μεταφορά υδάτινων μαζών. Η δική μας ανάλυση του ισοζυγίου επιβεβαιώνει ότι η τοπική επιφανειακή ροή δεν αρκεί πάντα για να εξηγήσει τη μεταβολή του θερμικού περιεχομένου. Δεν αποτελεί, όμως, πλήρη αιτιώδη απόδοση του περιφερειακού κλιματικού σήματος.

## 12. Τι γνωρίζουμε, τι υποδεικνύεται και τι δεν έχει αποδειχθεί

### Υψηλή εμπιστοσύνη

- Υπάρχει ισχυρή μακροχρόνια θέρμανση της επιφάνειας Πάρου–Αντιπάρου.
- Η θέρμανση εκτείνεται τουλάχιστον έως τα 300 m στο βαθύ περιφερειακό πεδίο.
- Το θερμικό περιεχόμενο 0–300 m αυξάνεται σημαντικά.
- Η πυκνομετρική στρωμάτωση ενισχύεται κυρίως λόγω διαφορικής θέρμανσης.
- Η διαλυτότητα του οξυγόνου μειώνεται.
- Το pH μειώνεται σε όλη τη στήλη 0–300 m και η τάση προϋπάρχει των ακραίων ετών 2023–2025.
- Ο DIC αυξάνεται αναλογικά ταχύτερα από την αλκαλικότητα.
- Το $pCO_2$ και ο παράγοντας Revelle αυξάνονται, υποδεικνύοντας εξασθένηση της ρυθμιστικής ικανότητας.

### Μέτρια ή μοντελοεξαρτώμενη εμπιστοσύνη

- Η πραγματική συγκέντρωση οξυγόνου μειώνεται στα 0–100 m στην πλήρη περίοδο, αλλά το εύρημα εξαρτάται από τα πρόσφατα έτη.
- Ορισμένα θρεπτικά παρουσιάζουν πτωτικές τάσεις και η παραγωγική ζώνη μετακινήθηκε βαθύτερα το 2024.
- Το 2024 είχε μικρότερη φυτοπλαγκτονική βιομάζα και ταχύτερο κύκλο άνθρακα.
- Η μη θερμική μεταβολή μειώνει τον κορεσμό αραγωνίτη, αλλά η συνολική τάση Ω δεν είναι ακόμη στατιστικά ασφαλής.

### Δεν έχει αποδειχθεί

- Δεν υπάρχει πολυετής in-situ χρονοσειρά θερμοκρασίας, οξυγόνου, pH, DIC και TA στους όρμους της Πάρου και της Αντιπάρου.
- Δεν έχει ποσοτικοποιηθεί άμεσα η τοπική δημιουργία βαθέων υδάτων ή η τρισδιάστατη μεταφορά θερμότητας και άνθρακα.
- Δεν έχει αποδειχθεί περιφερειακή υποξία, κατάρρευση πρωτογενούς παραγωγής ή επικίνδυνος υποκορεσμός αραγωνίτη.
- Δεν μπορούν να αποδοθούν επιπτώσεις σε συγκεκριμένα είδη, λιβάδια Ποσειδωνίας, αλιεύματα ή παράκτιους οικοτόπους χωρίς βιολογικές και επιτόπιες παρατηρήσεις.
- Η μη θερμική πτώση pH δεν μπορεί ακόμη να κατανεμηθεί πλήρως σε ανθρωπογενές $CO_2$, κυκλοφορία, βιολογία και μεταβολές αλκαλικότητας.

## 13. Πρόταση τοπικής παρακολούθησης Πάρου–Αντιπάρου

Η σημαντικότερη επόμενη επένδυση δεν είναι άλλο ένα μεμονωμένο δείγμα αλλά μια συνεπής χρονοσειρά. Ένα ρεαλιστικό πρόγραμμα θα πρέπει να περιλαμβάνει:

1. **Σταθερές θέσεις:** έναν παράκτιο όρμο με έντονη ανθρώπινη επίδραση, μία ανοιχτή παράκτια θέση και μία βαθύτερη υπεράκτια θέση αναφοράς.
2. **Κατακόρυφα προφίλ:** θερμοκρασία, αλατότητα, οξυγόνο, χλωροφύλλη και θολότητα από την επιφάνεια έως τον πυθμένα ή τουλάχιστον έως 100–300 m όπου είναι εφικτό.
3. **Ανθρακικό σύστημα:** τουλάχιστον δύο ανεξάρτητες μεταβλητές, ιδανικά pH ολικής κλίμακας μαζί με ολική αλκαλικότητα ή DIC, με πιστοποιημένα πρότυπα και πλήρη μεταδεδομένα.
4. **Συχνότητα:** εποχική δειγματοληψία ως ελάχιστο, ενισχυμένη σε θερμά επεισόδια, με αυτόνομους αισθητήρες θερμοκρασίας και οξυγόνου υψηλότερης συχνότητας.
5. **Βιολογική σύνδεση:** φυτοπλαγκτόν, Ποσειδωνία, ασβεστοποιοί οργανισμοί και βασικά αλιευτικά είδη, ώστε οι φυσικοχημικές μεταβολές να συνδεθούν με πραγματικές οικολογικές αποκρίσεις.
6. **Ανοικτά δεδομένα:** δημόσια τεκμηρίωση μεθόδων, βαθμονόμησης, αβεβαιότητας και χρονοσειρών, ώστε οι μελλοντικές αναλύσεις να είναι αναπαραγώγιμες.

Το πρόγραμμα πρέπει να σχεδιαστεί σε συνεργασία με το ΕΛΚΕΘΕ, πανεπιστημιακά εργαστήρια, τοπικούς φορείς, επαγγελματίες της θάλασσας και σχολεία. Η συμμετοχή πολιτών μπορεί να επεκτείνει

τη χωρική κάλυψη θερμοκρασίας και ορατών οικολογικών φαινομένων, αλλά δεν αντικαθιστά την αναλυτική ποιότητα που απαιτεί το ανθρακικό σύστημα.

## 14. Τελικό συμπέρασμα

Το ισχυρότερο αποτέλεσμα της παρούσης εργασίας είναι ότι η μεταβολή δεν είναι ούτε μόνο επιφανειακή ούτε μόνο θερμική. Η θέρμανση έχει εισχωρήσει σε βάθος, έχει αυξήσει το θερμικό απόθεμα και έχει ενισχύσει τη στρωμάτωση. Πάνω σε αυτή τη νέα φυσική βάση εμφανίζονται μικρότερη διαλυτότητα οξυγόνου, αλλαγές στην κατανομή θρεπτικών και της παραγωγικής ζώνης, σταθερή οξίνιση και εξασθένηση της ανθρακικής ρύθμισης.

Η μελέτη δεν περιγράφει μια θάλασσα που έχει ήδη καταρρεύσει. Περιγράφει μια θάλασσα της οποίας τα περιθώρια μεταβάλλονται: θερμικό περιθώριο για οργανισμούς, ενεργειακό περιθώριο για κατακόρυφη ανάμειξη, διαλυτότητα οξυγόνου και χημικό περιθώριο απέναντι σε πρόσθετο άνθρακα. Η απουσία σημερινής υποξίας ή χαμηλού Ω δεν είναι λόγος εφησυχασμού· είναι η αφετηρία από την οποία πρέπει να παρακολουθήσουμε πόσο γρήγορα μειώνεται η ανθεκτικότητα.

Για την Πάρο, η επιστημονικά υπεύθυνη διατύπωση είναι διπλή. Πρώτον, το περιφερειακό ωκεανογραφικό σήμα είναι ήδη ισχυρό και συνεπές. Δεύτερον, η πραγματική έκθεση των παράκτιων οικοσυστημάτων και των τοπικών κοινωνικών–οικονομικών δραστηριοτήτων δεν μπορεί να προσδιοριστεί χωρίς μόνιμη επιτόπια παρακολούθηση. Η τελική αξία αυτής της σύνθεσης δεν είναι μόνο ότι περιγράφει όσα γνωρίζουμε, αλλά ότι καθορίζει με ακρίβεια τι πρέπει να μετρηθεί στη συνέχεια.

# PART II: ENGLISH EDITION

*Complete scientific synthesis*

## One-page summary

The sea around Paros and across the Central Cyclades is not simply experiencing a sequence of isolated hot summers. Satellite observations and Copernicus Marine reanalyses reveal a statistically strong, multi-decadal shift towards warmer conditions. Mean sea-surface temperature in the Paros–Antiparos marine window increased by approximately **0.40°C per decade** over 1982–2025. The year 2024 was the warmest complete year in the record, with a mean anomaly of about **+1.31°C** relative to 1991–2020.

The warming is not confined to the surface. Within the strict deep-water regional footprint of the Central Cyclades, mean temperature increased by approximately **+0.446°C per decade at 0–20 m**, **+0.454°C at 20–100 m**, and **+0.331°C at 100–300 m** during 1987–2025. The average trend over 0–300 m was **+0.372°C per decade**, equivalent to an ocean heat-content increase of about **1.44 W/m²**. In 2024, the mean 0–300 m temperature anomaly was approximately **+1.18°C**, while the annual mean ocean heat-content anomaly reached **+1.445 GJ/m²**.

Because the upper layers warmed faster than the deeper layer, stratification strengthened. The density difference between 0–20 and 100–300 m increased by approximately **0.0403 kg/m³ per decade**. Mean density contrast in 2016–2025 was **13.7%** greater than in 1987–1996. The long-term signal is predominantly thermal: salinity strongly affects individual years but does not explain the full upward trend.

The biogeochemical responses are more complex. Warming has very clearly reduced oxygen solubility. Modelled oxygen concentration declines in the upper 100 m when the full 1999–2025 period is used, but this trend is sensitive to the most recent extreme years. There is no indication of regional hypoxia within 0–300 m. Surface nutrients were exceptionally low in 2024, while the nutricline and deep chlorophyll maximum shifted downwards. There is, however, no statistically secure evidence of a long-term collapse in chlorophyll or net primary production.

The clearest chemical change is acidification. pH declines by approximately **–0.011 to –0.012 units per decade** throughout the upper 300 m. This corresponds to a **2.6–2.9% increase in hydrogen-ion activity per decade**. The decline remains statistically significant when the analysis is restricted to the fully published 1999–2019 reanalysis period. The year 2024 had the lowest pH in every layer examined.

Aragonite saturation does not yet show a statistically secure downward trend. Non-thermal changes in the carbonate system lower saturation, whereas warming alone raises it slightly through thermodynamic effects, masking part of the decline. No modelled aragonite saturation value below 3 occurred in the offshore deep-water footprint. This is not proof of biological safety. The Revelle factor, in contrast, increased significantly by approximately **0.50–0.62% per decade**, showing that the carbonate buffering capacity of the water is weakening.

**Central conclusion.** The sea of the Central Cyclades is becoming warmer at depth, more stratified, more acidic, and less chemically resistant to further carbon addition. Ecological collapse is not demonstrated. A shift in the physical and chemical foundation on which the ecosystem operates is demonstrated.

## 1. Purpose and scientific setting

The Mediterranean is a semi-enclosed sea with intense exchanges of heat, freshwater and salt with the atmosphere. The Eastern Mediterranean is distinguished by strong evaporation, high salinity, oligotrophy and active dense-water formation. These characteristics make it particularly sensitive to changes in temperature, winter cooling, the hydrological balance and circulation.

Paros is not treated as an isolated point. It is an island case embedded within a wider system: Mediterranean → Eastern Mediterranean → Aegean → Central Cyclades → Paros–Antiparos. The climate literature identifies the Eastern Mediterranean as a region in which warming, stratification and acidification may develop rapidly. This report does not assume that every basin-scale conclusion applies unchanged to Paros. It tests the signal using defined datasets and states the geographic level of each result explicitly.

The investigation addresses four principal questions:

1. Is there a statistically reliable long-term warming trend, or are the recent anomalies merely extreme but isolated years?
2. Is warming confined to the surface, or has it penetrated into the water column and the sea's heat reservoir?
3. Is warming accompanied by stronger stratification and detectable biogeochemical change?
4. Is acidification statistically robust, and what does it mean for carbonate saturation and buffering capacity?

## 2. Data, spatial definition and strength of evidence

The analysis uses three main classes of data.

**Satellite sea-surface temperature.** The 1982–2025 time series comes from the Copernicus Marine reprocessed product `SST_MED_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_021`: daily nighttime foundation SST at 0.05° resolution. The detailed 2024 map uses the approximately 1 km ultra-high-resolution product from the same service. Satellite SST provides the strongest direct observational foundation in this study, but it is not a swimmer's shoreline measurement or a midday temperature in a shallow bay.

**Physical reanalysis.** Temperature, salinity, mixed-layer depth and ocean heat content come from `MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004`, with a 1/24° grid, approximately 4–5 km, and 141 vertical levels. The system is based on NEMO and assimilates temperature–salinity profiles and satellite sea-level data. It is a data-assimilative model, not a continuous local observing station.

**Biogeochemical reanalysis.** Oxygen, nutrients, chlorophyll, primary production, DIC, total alkalinity and pH come from `MEDSEA_MULTIYEAR_BGC_006_008`, at approximately 4 km and 125 vertical levels. MedBFM3 is driven by the physical reanalysis and assimilates weekly satellite surface chlorophyll.

Temperature therefore has a stronger independent observational basis than oxygen, nutrients or carbonate-system variables.

For the complete 0–300 m analysis, a 75 km geodesic circle centred on Paros at 37.05°N, 25.15°E was defined. Only 184 marine grid cells containing the complete 300 m column were retained. They cover 3,156.44 km², form nine disconnected deep basins, and the nearest grid cell lies 39.64 km from the centre of Paros. This strict choice guarantees a common vertical footprint but excludes shallow coastal waters.

The hierarchy of evidence is:

1. direct local in-situ observations, where available;
2. satellite observations;
3. physical reanalysis with data assimilation;
4. biogeochemical reanalysis;
5. wider regional literature and projections.

Linear trends use 95% confidence intervals with Newey–West/HAC covariance to account for temporal autocorrelation. Theil–Sen estimates and Kendall or Mann–Kendall tests provide robustness checks. Physical anomalies are mainly relative to 1991–2020; biogeochemical comparisons use 2000–2019. Statistical uncertainty in a trend is kept distinct from the structural uncertainty of the underlying model.

## 3. Surface warming around Paros and Antiparos

Annual mean SST increased by **+0.3997°C per decade** during 1982–2025. The 95% confidence interval is **+0.309 to +0.490°C per decade**, with an extremely small probability that the trend arose by chance. The Theil–Sen estimate, **+0.424°C per decade**, and the Kendall test lead to the same conclusion. Mean SST during 2016–2025 was **1.36°C** higher than during 1982–1991.

Warming occurs in every season but is strongest in summer and autumn: approximately **+0.464°C per decade** in summer and **+0.437°C** in autumn. This raises the thermal baseline on which shorter extreme events occur. A heatwave of the same meteorological magnitude now acts upon a sea that is already warmer.

The year 2024 had a mean SST of **20.895°C** and an anomaly of **+1.311°C** relative to 1991–2020. It was the warmest complete year in the record, ahead of 2010 and 2023. High-resolution spatial analysis showed a mean annual anomaly greater than +1°C throughout the marine window, reaching about +1.38°C in the warmest grid cells. In many locations, the daily anomaly exceeded +1°C on more than 200 days.

Using a marine-heatwave definition based on the 90th percentile of 1982–2011, a minimum duration of five days and limited joining of closely separated events, marine-heatwave days increased by about **28.5 days per decade**. The exact number depends on the definition and baseline, but the direction of change is clear.

## 4. Warming below the surface

The 1987–2025 physical reanalysis shows that warming has already penetrated deeply. Across the common 184-cell footprint, the trends were:

| Layer | Temperature trend | 95% Newey–West interval | Heat uptake |
|---|---|---|---|
| 0–20 m | +0.446°C/decade | +0.382 to +0.511 | +0.116 W/m² |
| 20–100 m | +0.454°C/decade | +0.360 to +0.547 | +0.470 W/m² |
| 100–300 m | +0.331°C/decade | +0.275 to +0.388 | +0.858 W/m² |
| 0–300 m | +0.372°C/decade | +0.312 to +0.432 | +1.443 W/m² |

The trend remains positive and statistically strong throughout the vertical profile to approximately 300 m. Near 300 m the estimate is about +0.30°C per decade. No statistically secure quadratic acceleration was detected within the relatively short 1987–2025 series. This does not contradict accelerating global climate change; it means that this regional record does not distinguish curvature reliably beyond its strong linear trend.

Approximately **59.4%** of the long-term 0–300 m heat-content increase lies in the 100–300 m layer, **32.5%** at 20–100 m and **8.0%** at 0–20 m. These shares are influenced by layer thickness. Nevertheless, they demonstrate that most of the additional energy in the water column is not confined to the upper 20 m. The sea has acquired a deep thermal memory.

In 2024, temperature anomalies were approximately **+1.36°C** at 0–20 m, **+1.58°C** at 20–100 m, and **+1.00°C** at 100–300 m. The mean full-column anomaly was **+1.18°C**. About 56.5% of the annual mean 0–300 m heat-content anomaly resided at 100–300 m.

## 5. Heat budget and the legacy of 2024

To examine whether the exceptional heat burden could be explained by the atmosphere alone, a diagnostic budget was constructed:

> **Change in 0–300 m ocean heat content = net surface-flux anomaly + residual.**

Surface fluxes came from Copernicus through May 2023 and were extended with ERA5 through December 2025. Seven blocked cross-validation intervals produced a monthly correlation of 0.997, an RMSE of 12.31 W/m², and an annual-mean RMSE of about 6.30 W/m².

The year 2023 combined a positive surface-flux anomaly, a much shallower mixed layer and a large increase in heat content. From October 2023 to March 2024, the net surface anomaly averaged approximately **+17.27 W/m²**, while the mixed layer was on average **26.3 m shallower** than climatology. The year 2024 therefore began with a substantial inherited heat surplus concentrated within a smaller volume of water.

From spring through summer 2024, the surface continued to add anomalous heat. In autumn, enhanced latent-heat loss reversed the reconstructed annual sign. Despite cooling in the upper 100 m by year-end, the 100–300 m layer gained approximately **0.428 GJ/m²** from December to December, and the complete column gained **0.278 GJ/m²**.

Across 2023–2025, the cumulative reconstructed surface anomaly was approximately **+0.411 GJ/m²**, whereas December ocean heat content increased by **+1.188 GJ/m²**. The positive residual, **+0.776 GJ/m²**,

shows that lateral and vertical transport, heat redistribution and differences between reanalysis products are essential. It cannot yet be assigned to a single mechanism.

The year 2025 provides an important correction to the idea that every warm year mechanically adds to the local heat reservoir. Despite a positive surface anomaly, December-to-December heat content changed very little: the upper 100 m gained heat while the 100–300 m layer lost nearly the same amount. Heat may be stored, redistributed or exported from the regional domain.

## 6. Stratification, vertical mixing and dense-water formation

Stratification describes the stability of the water column. When upper water is lighter than deeper water, energy is required to mix the layers. Warming reduces density; increasing salinity raises it. Sea-surface temperature alone is therefore insufficient to describe vertical circulation.

Three contrasts between 0–20 and 100–300 m were examined: temperature, salinity and density. Thermal contrast increased by **+0.115°C per decade**, and density contrast by **+0.0403 kg/m³ per decade**. Both trends are statistically strong. Salinity contrast showed no reliable long-term trend. Mean density contrast rose from 0.968 kg/m³ during 1987–1996 to 1.100 kg/m³ during 2016–2025.

The strengthening is visible in both summer and winter. The year 2024 had the largest annual density contrast in the complete record, **1.235 kg/m³**, or 0.172 kg/m³ above the 1991–2020 mean. Salinity reinforced stability in that particular year even though it does not explain the long-term trend. The year 2023 had the strongest winter density contrast, consistent with unusually shallow winter mixing before the 2024 maximum.

Stronger stratification may reduce nutrient supply to the euphotic zone and impede ventilation below. It can also influence dense-water formation, through which intense winter cooling and evaporation make surface waters dense enough to sink. The Aegean participates actively in the renewal of Eastern Mediterranean water masses, and the process is episodic: a very cold or saline winter may temporarily overcome the mean tendency.

Climate projections suggest that stronger stratification may substantially reduce future dense-water formation in the Aegean (Parras-Berrocal et al., 2023). This is a regional projection, not a result of our historical diagnosis. Our analysis demonstrates increasing resistance to mixing; it does not directly estimate dense-water volumes, vertical velocities or flows through specific passages.

## 7. Oxygen, nutrients and chlorophyll

Temperature affects oxygen in two distinct ways. First, warmer water dissolves less oxygen — a direct physicochemical effect. Second, stratification, mixing, production and respiration can alter actual concentration. Keeping these mechanisms separate is essential.

During 1999–2025, modelled oxygen concentration declined by **−1.248 mmol/m³ per decade at 0–20 m** and **−1.100 mmol/m³ at 20–100 m**. The −0.149 mmol/m³ trend at 100–300 m was not statistically significant. The theoretical saturation concentration declined faster, by approximately −1.68 to −1.91 mmol/m³ per decade. This indicates that the detected upper-ocean deoxygenation is driven primarily by lower solubility rather than a demonstrated increase in respiration or organic-matter decomposition.

The actual-concentration trend is period-sensitive. It does not cross the 5% significance threshold in the stricter 1999–2019 interval, whereas declining solubility remains significant. The direct physical effect of warming is therefore more robust than long-term biogeochemical deoxygenation.

The year 2024 had the lowest modelled oxygen concentration in every layer, approximately 1.0–2.0% below the 2000–2019 mean. Absolute values, around 7.1–7.4 mg/L, remained far above the commonly used hypoxia threshold of 2 mg/L. There is no indication of regional hypoxia at 0–300 m.

Nitrate showed downward trends at 0–20 and 100–300 m over 1999–2025, and deeper phosphate also declined. Several trends weaken when years after 2019 are removed and should be described as recently strengthening indications. Annual density stratification is negatively correlated with surface nitrate after detrending, but the physical and biogeochemical products are coupled; this is not independent causal proof.

The year 2024 recorded the lowest surface nitrate and phosphate in the series, approximately **18.4%** and **32.1%** below the baseline. The summer subsurface oxygen maximum was about 17 m deeper, the deep chlorophyll maximum 12.5 m deeper, and the 1 mmol/m³ nutricline about 15 m deeper. Their simultaneous displacement is consistent with deeper isolation of nutrients and the productive layer, but their long-term depth trends are not statistically secure.

Chlorophyll shows no reliable long-term trend in any principal layer. The integrated 0–100 m stock was 14.1% below baseline in 2024 and the second lowest in the series, but interannual variability does not support a claim of demonstrated collapse.

## 8. Primary production and the apparent 2024 paradox

Chlorophyll is not identical to phytoplankton biomass, and biomass is not identical to production rate. A dedicated analysis of phytoplankton carbon and net primary production revealed an important apparent paradox.

The year 2024 had the lowest annual modelled phytoplankton carbon biomass in the record, approximately 19–21% below baseline depending on layer. Yet annual net primary production did not decline. Over 0–300 m, it was the highest value produced by the model. Production per unit biomass was also the highest, suggesting faster carbon turnover and necessarily greater aggregate losses through grazing, respiration, mortality, dissolution or export.

Seasonality explains part of the result. During summer 2024, 0–100 m NPP declined by approximately **8%**, while biomass declined by **31.8%**. Higher winter, spring and autumn production offset the summer reduction. The result is consistent with seasonal redistribution, not a general cessation of production.

The chlorophyll-to-phytoplankton-carbon ratio increases significantly. Chlorophyll may therefore understate the reduction in carbon biomass. In summer 2024, the deep chlorophyll maximum and phytoplankton-carbon maximum coincided at approximately 118 m, but this does not imply that every deep chlorophyll maximum is always a true biomass maximum.

This result is especially model-dependent. In BFM, temperature accelerates many metabolic processes through a Q10 function. Other Mediterranean models, with different formulations of adaptation and nutrient limitation, can produce different responses. The defensible conclusion is that long-term

productivity collapse is not demonstrated, while 2024 displays a clear recent shift in pelagic-system functioning.

## 9. Acidification throughout the upper 300 m

pH is a logarithmic measure of hydrogen-ion activity. A decline in pH does not mean that seawater becomes "acidic" in the everyday sense or falls below pH 7. It means a shift towards greater acidity. A decline of 0.01 pH unit corresponds to an increase of roughly 2.3% in $H^+$ activity.

The pH trend is the clearest biogeochemical change in the analysis:

| Layer | Mean pH 2000–2019 | Trend per decade | $H^+$ increase/decade | pH in 2024 |
|---|---|---|---|---|
| 0–20 m | 8.1043 | −0.01233 | +2.88% | 8.0806 |
| 20–100 m | 8.1244 | −0.01211 | +2.83% | 8.0960 |
| 100–300 m | 8.1409 | −0.01103 | +2.57% | 8.1178 |
| 0–300 m | 8.1338 | −0.01141 | +2.66% | 8.1092 |

Every trend is statistically strong with Newey–West correction and remains significant over 1999–2019. Acidification is not created solely by the 2023–2025 extremes and is not confined to one season. The year 2024 had the lowest pH in all layers, with $H^+$ activity approximately 5.5–6.8% above baseline.

Dissolved inorganic carbon increased by approximately **+16.6 to +17.1 µmol/kg per decade**, and total alkalinity by **+14.7 to +15.3 µmol/kg**. Salinity increased by approximately 0.09–0.10 PSU per decade, so part of the DIC and TA rise reflects concentration. However, values normalised to salinity 38 also rise, and the DIC/TA ratio increases in every layer. The change cannot be explained by evaporation alone.

The high alkalinity of the Eastern Mediterranean provides a substantial buffer but does not prevent acidification. Rapid renewal and sinking of water masses may also facilitate the transfer of absorbed carbon into deeper layers. The first high-frequency pH and $pCO_2$ time series at the Heraklion buoy provides a valuable external reference, but its short duration and distance from the Cyclades do not make it a local validation dataset (Frangoulis et al., 2024).

## 10. Carbonate ions, saturation and buffering capacity

pH alone is insufficient to characterise the carbonate system. Carbonate-ion concentration and saturation state Ω describe the thermodynamic margin for calcium-carbonate minerals. Ω=1 is the thermodynamic saturation boundary, not a universal biological threshold.

Calculations were performed for every three-dimensional grid cell and month with PyCO2SYS 1.8.3.4, using DIC and TA together with temperature, salinity, pressure and phosphate. The selected Hansson/Dickson–Millero constants reproduced the internal MedBFM pH with an RMSE of approximately 0.00060. This establishes numerical internal consistency, not independent observational accuracy. The official QUID reports pH RMSD values of approximately 0.034–0.042 against Mediterranean in-situ data at 0–300 m.

Baseline mean aragonite saturation was 3.924 at 0–20 m, 3.776 at 20–100 m and 3.561 at 100–300 m. Central trend estimates were negative — **−0.0134**, **−0.00837** and **−0.00322 per decade**, respectively —

but none of the confidence intervals excluded zero. Carbonate-ion decline was significant only at 0–20 m for the complete period, not during 1999–2019.

Across 2,623,104 point-month calculations, no aragonite saturation value below 3 occurred. The minimum was approximately 3.314 using the primary solution and 3.284 under the alternative Lueker constants. The absence of low modelled saturation in the offshore footprint does not exclude biological effects of lower pH or different extremes in shallow bays, where respiration, production, freshwater inputs and diel variability may be stronger.

Trend decomposition showed that approximately **47–52%** of the pH decline is the direct thermodynamic effect of warming, while **48–53%** is the non-thermal DIC–TA–salinity–phosphate component. The non-thermal component lowers aragonite saturation, whereas warming alone raises it slightly. The two effects therefore partly cancel. “Non-thermal” is not synonymous with anthropogenic $CO_2$; it also includes circulation, mixing, biology, salinity and alkalinity change.

Diagnostic $pCO_2$ increased by **+12.8 to +15.9 µatm per decade**, and the Revelle factor by **+0.0489 to +0.0590 per decade**, or approximately 0.50–0.62%. These trends are strong and remain significant during 1999–2019. This is the most consistent conclusion of the second carbonate phase: even where Ω does not yet show a clear decline, the same relative DIC addition progressively produces a larger relative rise in $pCO_2$. Carbonate buffering is weakening.

## 11. Integrated interpretation: a multiple-stressor system

The findings form a coherent but not simplistic chain. Rising temperature increases heat storage and, because upper layers warm faster, strengthens stratification. Stronger stratification raises resistance to mixing and may limit nutrient resupply or ventilation. At the same time, warming directly lowers oxygen solubility and pH. A rising DIC-to-alkalinity relationship adds a second, non-thermal acidification component.

Not every variable changes in the same direction or at the same rate. Oxygen has not reached hypoxic levels. Chlorophyll and NPP do not show a demonstrated long-term collapse. Aragonite saturation remains high and lacks a statistically secure trend, partly because warming thermodynamically offsets the non-thermal decline. These apparent contradictions do not negate system change; they reveal the interaction of distinct mechanisms and timescales.

The year 2024 serves as a stress test. It combined heat inherited from 2023, shallower winter mixing, high temperature at depth, record annual density contrast, low oxygen and nutrients, low phytoplankton biomass and record-low pH. Yet it did not have the lowest aragonite saturation or the lowest annual NPP. This is precisely why the state of the sea cannot be described by a single indicator.

Rapid change in the Eastern Mediterranean does not have one local cause. It is linked to atmospheric and surrounding land warming, the semi-enclosed nature of the basin, changes in winter heat loss, evaporation and salinity, stratification, and water-mass transport. Our heat-budget diagnosis confirms that local surface forcing alone does not always explain changes in regional heat content. It is not, however, a complete causal attribution of the regional climate signal.

## 12. What is known, what is indicated and what is not demonstrated

### High confidence

- Strong long-term surface warming is present around Paros–Antiparos.
- Warming extends to at least 300 m in the deep regional footprint.
- Ocean heat content over 0–300 m is increasing significantly.
- Density stratification is strengthening, primarily through differential warming.
- Oxygen solubility is declining.
- pH is declining throughout 0–300 m, with a trend predating the 2023–2025 extremes.
- DIC is increasing proportionally faster than alkalinity.
- $pCO_2$ and the Revelle factor are increasing, indicating weaker buffering capacity.

### Moderate or model-dependent confidence

- Actual oxygen concentration declines in the upper 100 m over the full period, but the result is sensitive to recent years.
- Some nutrients show downward trends, and the productive layer shifted deeper in 2024.
- The year 2024 had lower phytoplankton biomass and faster carbon turnover.
- Non-thermal change lowers aragonite saturation, but the total Ω trend is not yet statistically secure.

### Not demonstrated

- There is no multi-year in-situ time series of temperature, oxygen, pH, DIC and TA in bays around Paros or Antiparos.
- Local dense-water formation and three-dimensional heat and carbon transport have not been directly quantified.
- Regional hypoxia, collapse of primary production and hazardous aragonite undersaturation have not been demonstrated.
- Impacts on specific species, Posidonia meadows, fisheries or coastal habitats cannot be attributed without biological and local observations.
- The non-thermal pH decline cannot yet be partitioned fully among anthropogenic $CO_2$, circulation, biology and alkalinity change.

## 13. A local observing strategy for Paros and Antiparos

The most valuable next investment is not another isolated sample but a consistent time series. A realistic programme should include:

1. **Fixed sites:** one human-influenced bay, one open coastal site and one deeper offshore reference site.
2. **Vertical profiles:** temperature, salinity, oxygen, chlorophyll and turbidity from the surface to the seabed, or to at least 100–300 m where feasible.

3. **Carbonate system:** at least two independent variables, ideally total-scale pH together with total alkalinity or DIC, supported by certified reference materials and complete metadata.
4. **Frequency:** seasonal sampling as a minimum, intensified during warm extremes, with autonomous higher-frequency temperature and oxygen sensors.
5. **Biological connection:** phytoplankton, Posidonia, calcifying organisms and important fishery species, allowing physicochemical change to be linked to actual ecological responses.
6. **Open data:** public documentation of methods, calibration, uncertainty and time series so that future analyses are reproducible.

The programme should be developed with the Hellenic Centre for Marine Research, university laboratories, local institutions, marine professionals and schools. Citizen participation can extend spatial coverage of temperature and visible ecological events, but it cannot replace the analytical quality required for carbonate-system measurements.

## 14. Final conclusion

The strongest result of this investigation is that change is neither surface-only nor temperature-only. Warming has penetrated into the water column, increased heat storage and strengthened stratification. Upon this altered physical foundation, we detect lower oxygen solubility, changes in nutrient and productive-layer distribution, persistent acidification and weakening carbonate buffering.

The report does not describe a sea that has already collapsed. It describes a sea whose margins are shifting: the thermal margin available to organisms, the energetic margin for vertical mixing, oxygen solubility, and the chemical margin against additional carbon. The present absence of hypoxia or low Ω is not a reason for complacency; it is the baseline from which the rate of declining resilience must be monitored.

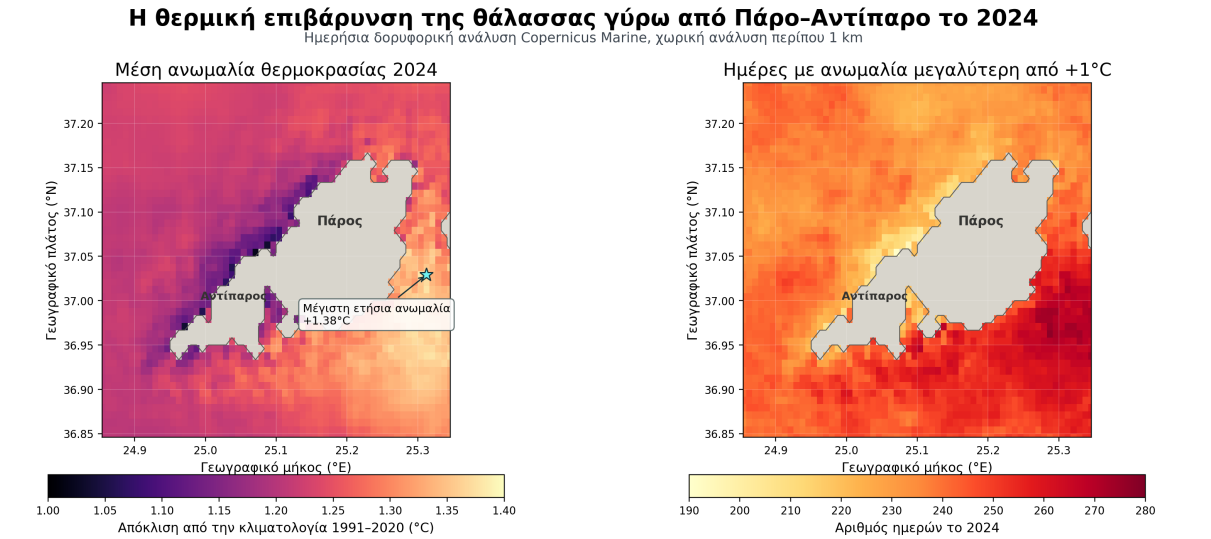
For Paros, the scientifically responsible conclusion has two parts. First, the regional oceanographic signal is already strong and coherent. Second, the actual exposure of coastal ecosystems and local social and economic activities cannot be determined without sustained local observations. The value of this synthesis lies not only in describing what is known, but also in defining precisely what must be measured next.

# ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ: ΚΟΙΝΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ / PART III: SHARED APPENDICES

## Παράρτημα Α. Βασικά αριθμητικά ευρήματα / Appendix A. Key quantitative findings

| Δείκτης / Indicator | Περίοδος / Period | Κεντρική εκτίμηση / Central estimate | Ερμηνεία / Interpretation |
|---|---|---|---|
| SST Πάρου–Αντιπάρου / Paros–Antiparos SST | 1982–2025 | +0,400°C/δεκ. / decade | Ισχυρή δορυφορική τάση / Strong satellite trend |
| Ανωμαλία SST 2024 / 2024 SST anomaly | 2024 vs 1991–2020 | +1,311°C | Θερμότερο πλήρες έτος / Warmest complete year |
| Θερμοκρασία 0–300 m / 0–300 m temperature | 1987–2025 | +0,372°C/δεκ. / decade | Θέρμανση σε βάθος / Warming at depth |
| Θερμική πρόσληψη 0–300 m / 0–300 m heat uptake | 1987–2025 | +1,443 W/m² | Αύξηση θερμικού αποθέματος / Increasing heat reservoir |
| Πυκνομετρική αντίθεση / Density contrast | 1987–2025 | +0,0403 kg/m³/δεκ. | Ισχυρότερη στρωμάτωση / Stronger stratification |
| $O_2$ 0–20 m | 1999–2025 | −1,248 mmol/m³/δεκ. | Κυρίως διαλυτότητα· ευαίσθητο στην περίοδο / Mainly solubility; period-sensitive |
| pH 0–300 m | 1999–2025 | −0,01141/δεκ. | Σταθερή οξίνιση / Persistent acidification |
| $H^+$ 0–300 m | 1999–2025 | +2,66%/δεκ. | Λογαριθμική σημασία pH / Logarithmic meaning of pH |
| Ω αραγωνίτη 0–300 m / Aragonite Ω | 1999–2025 | −0,00527/δεκ., p=0,350 | Μη στατιστικά ασφαλής τάση / Not statistically secure |
| Revelle 0–300 m | 1999–2025 | +0,0506/δεκ. | Εξασθένηση ρύθμισης / Weakening buffer capacity |

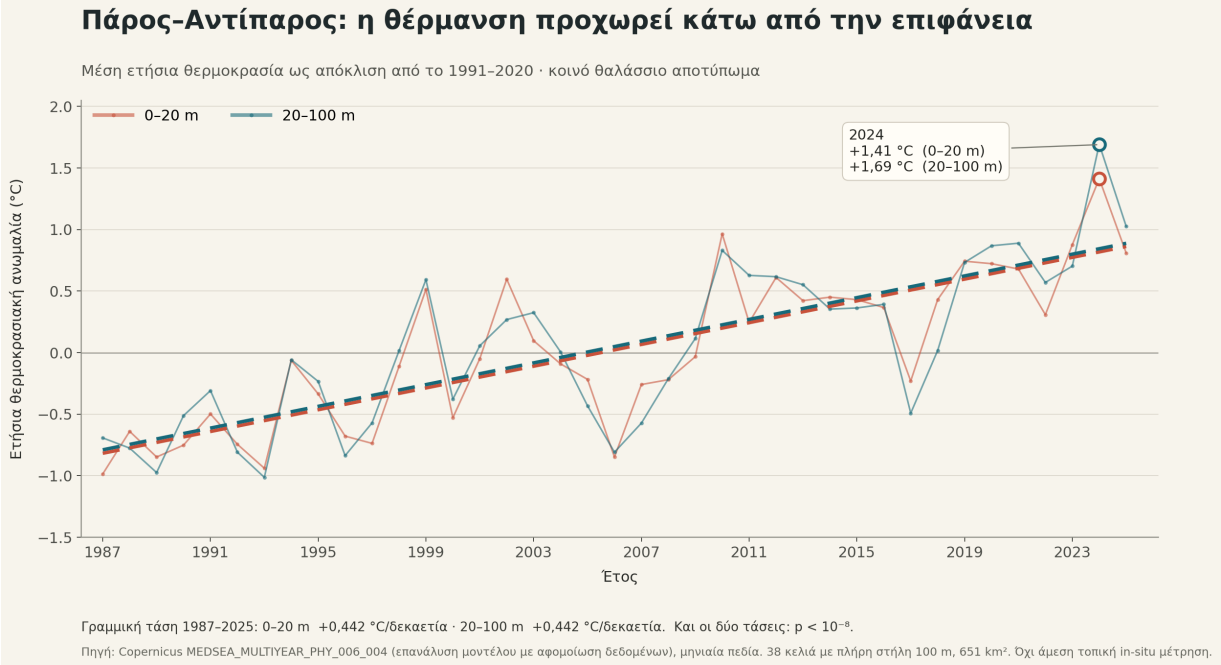
## Παράρτημα Β. Εικόνες / Appendix B. Figures



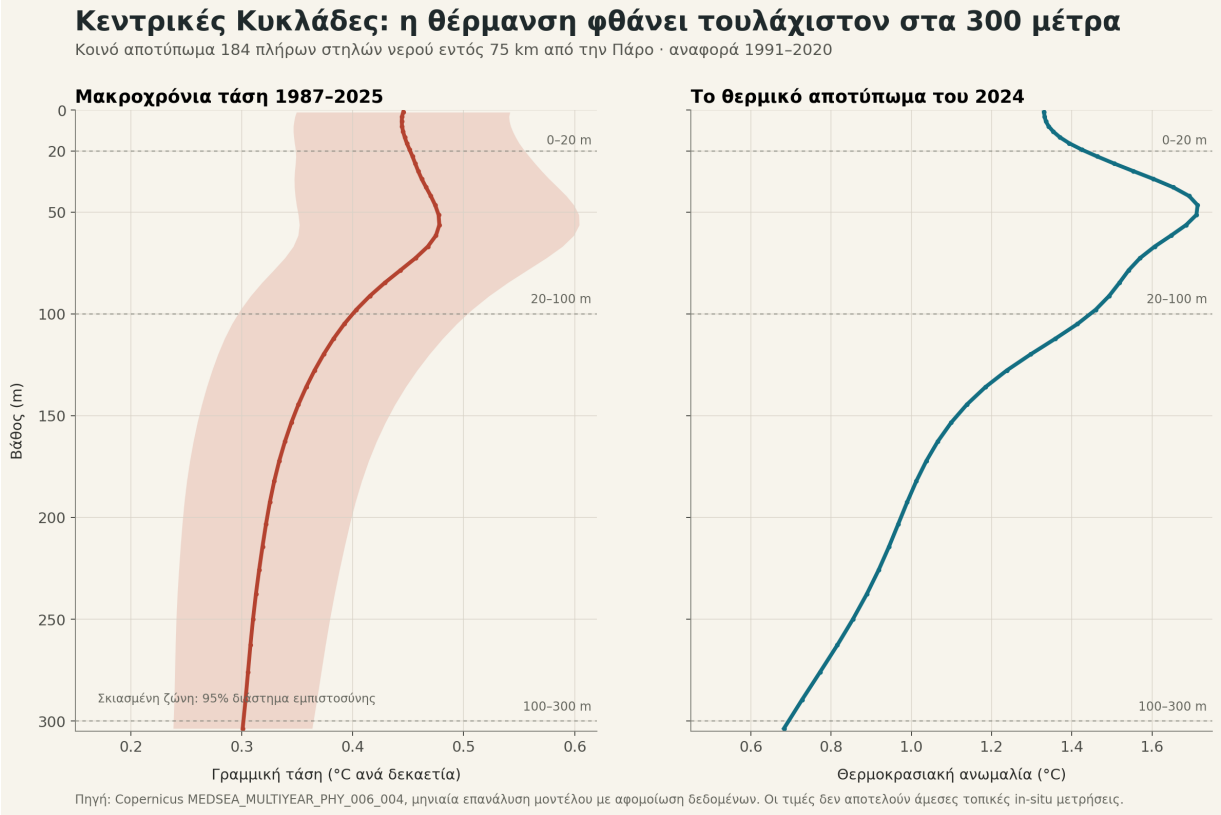

Σημείωση: Η ανωμαλία είναι η διαφορά από την ημερήσια κλιματολογία 1991–2020. Οι γκρίζες περιοχές είναι ξηρά. Οι τιμές είναι δορυφορική θερμοκρασία θεμελίου της θαλάσσιας επιφάνειας, όχι μεσημεριανή μέτρηση παραλίας.

Πηγή: Copernicus Marine Service / CNR-ISMAR, SST_MED_SSTA_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_004_d. Επεξεργασία: τοπική ανάλυση Πάρου-Αντιπάρου.

*Εικόνα 1 / Figure 1. Η θερμική επιβάρυνση της θάλασσας γύρω από Πάρο–Αντίπαρο το 2024. Η ανωμαλία υπολογίζεται έναντι της ημερήσιας κλιματολογίας 1991–2020. / Thermal anomaly around Paros–Antiparos in 2024, relative to the daily 1991–2020 climatology.*




*Εικόνα 2 / Figure 2. Η θέρμανση έχει προχωρήσει κάτω από την επιφάνεια στο κοινό αποτύπωμα των πρώτων 100 m. / Warming has penetrated below the surface within the common upper-100 m footprint.*




*Εικόνα 3 / Figure 3. Κατακόρυφο προφίλ της τάσης 1987–2025 και της θερμοκρασιακής ανωμαλίας του 2024 στο βαθύ περιφερειακό πεδίο των Κεντρικών Κυκλάδων. / Vertical profile of the 1987–2025 trend and the 2024 temperature anomaly in the deep regional Central Cyclades domain.*

## Παράρτημα Γ. Μεθοδολογικές σημειώσεις / Appendix C. Methodological notes

### Γ.1 Χρονική στάθμιση / C.1 Temporal weighting

Οι μηνιαίες τιμές σταθμίστηκαν κατά τον πραγματικό αριθμό ημερών κάθε μήνα για τον υπολογισμό των ετήσιων μέσων. Οι ανωμαλίες υπολογίστηκαν έναντι του αντίστοιχου ημερολογιακού μήνα της κλιματολογίας, αποτρέποντας τη σύγχυση της εποχικότητας με τη μακροχρόνια τάση. / Monthly values were weighted by the actual number of days when annual means were calculated. Anomalies were computed relative to the corresponding climatological calendar month, preventing seasonality from being confused with long-term change.

### Γ.2 Χωρική και κατακόρυφη στάθμιση / C.2 Spatial and vertical weighting

Η SST σταθμίστηκε κατά το συνημίτονο του γεωγραφικού πλάτους ή το πραγματικό εμβαδό κελιού. Οι θερμοκρασίες στρωμάτων και το θερμικό περιεχόμενο χρησιμοποίησαν πραγματικό πάχος κελιού. Τα αποθέματα βιογεωχημικών μεταβλητών σταθμίστηκαν κατά όγκο ή μάζα νερού, ανάλογα με τη μονάδα. Το pH υπολογίστηκε ως μέσος όρος ενεργότητας $H^+$ και επαναμετατράπηκε σε pH. / SST was weighted by cosine latitude or actual grid-cell area. Layer temperatures and heat content used actual cell thickness. Biogeochemical inventories were weighted by water volume or mass as required by their units. pH was averaged in hydrogen-ion activity space and converted back to pH.

### Γ.3 Στατιστική / C.3 Statistics

Η κύρια εκτίμηση είναι γραμμική τάση OLS με 95% διάστημα εμπιστοσύνης Newey–West/HAC και μέγιστη υστέρηση έως τρία έτη. Theil–Sen και Kendall χρησιμοποιήθηκαν ως μη παραμετρικοί έλεγχοι ανθεκτικότητας. Η τιμή p περιγράφει την αβεβαιότητα της τάσης μέσα στο συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων· δεν περιλαμβάνει σφάλματα αισθητήρων, ατελή χωρική δειγματοληψία ή δομική αβεβαιότητα του μοντέλου. / The primary estimate is an OLS linear trend with a 95% Newey–West/HAC interval and a maximum lag of up to three years. Theil–Sen and Kendall methods were used as non-parametric robustness checks. A p-value describes trend uncertainty within the dataset; it does not include sensor error, incomplete spatial sampling or structural model uncertainty.

### Γ.4 Ανθρακικό σύστημα / C.4 Carbonate system

Το PyCO2SYS 1.8.3.4 χρησιμοποιήθηκε με DIC και TA ως ζεύγος εισόδου. Η επιλογή σταθερών Hansson με αναπροσαρμογή Dickson–Millero επιλέχθηκε από πέντε υποψήφιες λύσεις επειδή αναπαρήγαγε καλύτερα το εσωτερικό pH του MedBFM. Έλεγχοι με Lueker και με προσθήκη πυριτικού έδειξαν ότι τα κύρια συμπεράσματα για τις τάσεις και την απουσία Ω αραγωνίτη κάτω από 3 είναι ανθεκτικά. / PyCO2SYS 1.8.3.4 was used with DIC and TA as the input pair. Hansson constants refitted by Dickson and Millero were selected from five alternatives because they best reproduced internal MedBFM pH. Tests using Lueker constants and added silicate showed that the main conclusions about trends and the absence of aragonite Ω below 3 were robust.

## Παράρτημα Δ. Αναπαραγωγιμότητα / Appendix D. Reproducibility

Για κάθε κύρια φάση διατηρούνται τα αρχεία εισόδου ή τα εξαγόμενα υποσύνολα, οι μηνιαίοι και ετήσιοι πίνακες, τα μεταδεδομένα, ο κώδικας ανάλυσης και τα αρχεία σύνοψης. Τα βασικά πακέτα καλύπτουν: επιφανειακή θέρμανση, υποεπιφανειακή θέρμανση, θερμικό περιεχόμενο, θερμικό ισοζύγιο, στρωμάτωση, βιογεωχημεία, παραγωγικότητα, οξίνιση και ανθρακικό κορεσμό. / For each principal phase, input or extracted subsets, monthly and annual tables, metadata, analysis code and summary files have been retained. The main packages cover surface warming, subsurface warming, heat content, heat budget, stratification, biogeochemistry, productivity, acidification and carbonate saturation.

Η αναπαραγωγιμότητα επιτρέπει την επανάληψη των αριθμητικών υπολογισμών από τα ίδια προϊόντα. Δεν μετατρέπει την επανάλυση σε επιτόπια παρατήρηση και δεν εξαλείφει τη δομική αβεβαιότητα του συστήματος Copernicus–NEMO–MedBFM. / Reproducibility permits the numerical calculations to be repeated from the same products. It does not turn reanalysis into an in-situ observation or eliminate structural uncertainty in the Copernicus–NEMO–MedBFM system.

## Βιβλιογραφία και πηγές / References and sources

1. Copernicus Marine Service. *Mediterranean Sea – High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed*, SST_MED_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_021. DOI: 10.48670/moi-00173. https://data.marine.copernicus.eu/product/SST_MED_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_021/description
2. Copernicus Marine Service. *Mediterranean Sea High Resolution and Ultra High Resolution Sea Surface Temperature Analysis*, SST_MED_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_004.

https://data.marine.copernicus.eu/product/SST_MED_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_004/description

3. Copernicus Marine Service. *Mediterranean Sea Physics Reanalysis*, MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004. DOI: 10.48670/mds-00375. https://data.marine.copernicus.eu/product/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004/description
4. Copernicus Marine Service. *Mediterranean Sea Biogeochemistry Reanalysis*, MEDSEA_MULTIYEAR_BGC_006_008. DOI: 10.48670/mds-00374. https://data.marine.copernicus.eu/product/MEDSEA_MULTIYEAR_BGC_006_008/description
5. Copernicus Marine Service (2025). *Quality Information Document for MEDSEA_MULTIYEAR_BGC_006_008*, Issue 3.3, 28 May 2025. https://documentation.marine.copernicus.eu/QUID/CMEMS-MED-QUID-006-008.pdf
6. Hersbach, H. et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803
7. Napolitano, E. et al. (2025). Unprecedented Mediterranean Sea warming in 2024: analysis of the driving mechanisms. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1668204. https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1668204
8. Cossarini, G. et al. (2021). High-resolution reanalysis of the Mediterranean Sea biogeochemistry (1999–2019). *Frontiers in Marine Science*, 8, 741486. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.741486
9. Reale, M. et al. (2022). Acidification, deoxygenation, and nutrient and biomass declines in a warming Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, 19, 4035–4065. https://doi.org/10.5194/bg-19-4035-2022
10. Parras-Berrocal, I. M. et al. (2023). Dense water formation in the eastern Mediterranean under a global warming scenario. *Ocean Science*, 19, 941–952. https://doi.org/10.5194/os-19-941-2023
11. Coma, R. et al. (2009). Global warming-enhanced stratification and mass mortality events in the Mediterranean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 6176–6181. https://doi.org/10.1073/pnas.0805801106
12. Di Biagio, V. et al. (2022). Subsurface oxygen maximum in oligotrophic marine ecosystems. *Biogeosciences*, 19, 5553–5574. https://doi.org/10.5194/bg-19-5553-2022
13. Teruzzi, A. et al. (2021). Deep chlorophyll maximum and nutricline in the Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, 18, 6147–6166. https://doi.org/10.5194/bg-18-6147-2021
14. Saygu, İ., Bengil, E. G. T. & Mavruk, S. (2026). A basin-wide assessment of pH changes in the Mediterranean Sea based on reanalysis products. *Environmental Sciences Europe*. https://doi.org/10.1186/s12302-026-01441-5
15. Frangoulis, C. et al. (2024). A carbonate system time series in the Eastern Mediterranean Sea: two years of high-frequency in-situ observations and remote sensing. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1348161. https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1348161
16. Tsiaras, K. et al. (2024). Carbonate system variability in the Mediterranean Sea: a modelling study. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1347990. https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1347990

17. Humphreys, M. P. et al. (2022). PyCO2SYS v1.8: marine carbonate system calculations in Python. *Geoscientific Model Development*, 15, 15–43. https://doi.org/10.5194/gmd-15-15-2022

18. Orr, J. C. et al. (2015). Accuracy and consistency of ocean carbonate system calculations. *Biogeosciences*, 12, 1483–1510. https://doi.org/10.5194/bg-12-1483-2015

19. Egleston, E. S., Sabine, C. L. & Morel, F. M. M. (2010). Revelle revisited: buffer factors that quantify the response of ocean chemistry to changes in DIC and alkalinity. *Global Biogeochemical Cycles*, 24, GB1002. https://doi.org/10.1029/2008GB003407

20. Jiang, L.-Q. et al. (2019). Surface ocean pH and buffer capacity: past, present and future. *Scientific Reports*, 9, 18624. https://doi.org/10.1038/s41598-019-55039-4

21. Cyronak, T. et al. (2016). What really drives lower calcification rates in an acidifying ocean? *ICES Journal of Marine Science*, 73, 558–562. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsv075

**Προτεινόμενη παραπομπή / Suggested citation**

Μαραγκόζης, Β. (2026). *Η Μεσόγειος που αλλάζει — Μια επιστημονική εξερεύνηση του Αιγαίου και των Κυκλάδων. Τόμος Ι: Θέρμανση, στρωμάτωση, βιογεωχημεία και οξίνιση στις Κεντρικές Κυκλάδες, 1982–2025*. Έκδοση 1.0, Παρατηρητήριο Βιώσιμης Ανάπτυξης Πάρου.

Marangozis, B. (2026). *The Changing Mediterranean — A Scientific Exploration of the Aegean and the Cyclades. Volume I: Warming, stratification, biogeochemistry and acidification in the Central Cyclades, 1982–2025*. Version 1.0, Paros Sustainable Development Observatory.